



IX CONGRESSO DE  
Construção Metálica &  
e Mista

I CONGRESSO  
LUSO-BRASILEIRO DE  
Construção Metálica Sustentável

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE VIDRO REFORÇADO COM ELEMENTOS METÁLICOS EMBEBIDOS

Isabel B. Valente<sup>a,\*</sup>, Paulo J. S. Cruz<sup>b</sup>, Paulo L. L. Carvalho<sup>c</sup> e Lúcio Alves<sup>d</sup>

<sup>a</sup>*ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*  
<sup>b,c,d</sup>*ISISE, Escola de Arquitetura, Universidade do Minho*

**Resumo.** O presente artigo descreve a simulação numérica de vigas de vidro laminado reforçadas com chapa de aço inoxidável perfurada, onde o Polivinil Butiral (PVB) e o SentryGlas (SG) são utilizados como materiais de película intercalar. Numa fase anterior, essas vigas foram analisadas experimentalmente em ensaios realizados por Marinho [1] no Laboratório de Construção e Tecnologia da Escola de Arquitetura da Universidade do Minho. Os resultados obtidos com os modelos numéricos são calibrados com os resultados obtidos nos ensaios experimentais. Os modelos numéricos são desenvolvidos com o programa de elementos finitos ATENA<sup>®</sup>.

### 1. Introdução

No passado, o vidro foi usado preferencialmente em elementos de revestimento de edifícios. As atuais tendências arquitetónicas e os desenvolvimentos tecnológicos recentes trouxeram oportunidades sem precedentes ao uso de vidro em edifícios e à sua utilização como elemento estrutural resistente. As aplicações estruturais do vidro são cada vez mais ousadas e continuam a impulsionar o desenvolvimento de elementos estruturais de vidro com elevada resistência residual.

Feirabend [2] propôs incorporar um reforço de metal, como malhas de aço inoxidável, arame, finas folhas de metal perfuradas e tecidos de fibras de alta resistência, para aumentar o valor da força residual no vidro laminado. Se a temperatura da camada intermédia excede a temperatura de transição vítrea ( $T_G$ ) ( $T_G$  de PVB = 10-15 °C;  $T_G$  de SG = 55 °C), a resistência e a rigidez são reduzidas. Particularmente, a rigidez ao corte da camada intercalar será reduzida, afectando a acção do compósito laminado quando nenhum painel de vidro é quebrado, [2].

Em vez de minimizar a probabilidade de rotura do vidro, a ideia de incorporar reforços de metal aponta para uma elevada resistência residual dos elementos de vidro reforçados, minimizando as consequências da sua rotura frágil. Após a rotura do vidro, a presença da

chapa de aço deverá permitir a transferência da totalidade ou de parte dos esforços mobilizados, impedindo que o elemento entre em colapso.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho estrutural de vigas de vidro com diferentes materiais intercalares e a eficácia de um novo sistema de reforço. Este sistema de reforço consiste na incorporação de chapas de aço inoxidável perfuradas que são embebidas entre as chapas de vidro e duas lâminas de material intercalar durante o processo de laminação (Fig. 1).

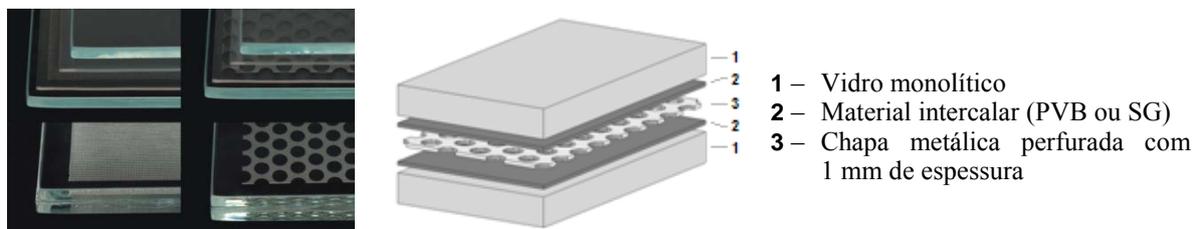


Fig. 1: Incorporação de chapas de aço inoxidável perfuradas no processo de laminação do vidro

São desenvolvidos modelos numéricos que procuram representar de forma adequada o comportamento do vidro laminado simples ou reforçado. Para a implementação dos modelos numéricos foi necessário utilizar dados obtidos durante o ensaio experimental relativos às características do aço utilizado, à geometria dos provetes e às condições de carga e de apoio e dados obtidos na bibliografia relativos às características do vidro e dos materiais intercalares. Deste modo, ao longo do presente artigo são abordados os conceitos necessários à elaboração da análise numérica, descrevem-se as propriedades dos materiais, as relações constitutivas consideradas para os materiais utilizados nos modelos numéricos, a geometria dos modelos numéricos de acordo com os provetes ensaiados experimentalmente e a malha de elementos finitos definida para os modelos. Por fim, analisam-se os resultados numéricos obtidos comparando-os com os resultados experimentais.

## 2. Propriedades dos materiais

A Tabela 1 apresenta os valores das propriedades mecânicas do vidro, de acordo com a norma EN 572-1:2004 [3], dos materiais intercalares utilizados no modelo numérico [4, 6] e do aço inoxidável utilizado, que foram determinados, tal como se mostra mais à frente neste artigo.

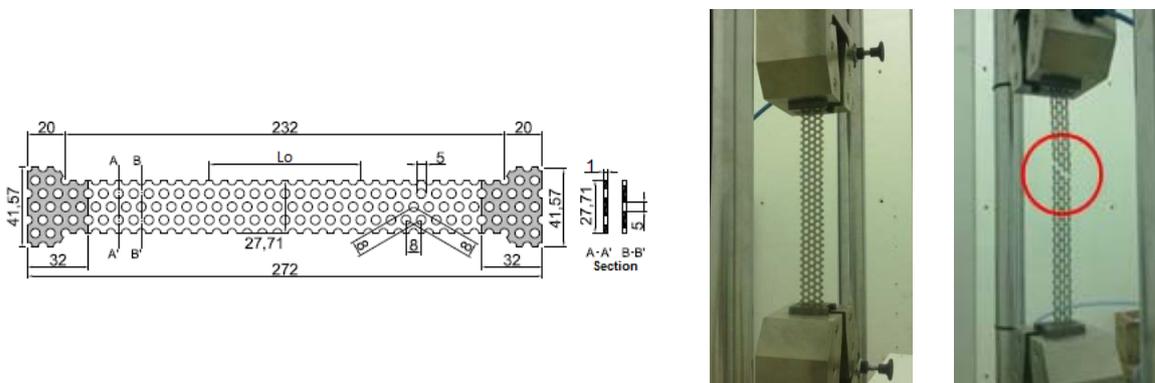
Tabela 1: Propriedades do vidro, dos materiais intercalares e do aço inoxidável [3, 4,6]

Propriedades	Unidades	Material			
		Vidro	PVB	SentryGlas	Aço
Densidade ( $\rho$ )	kg/m <sup>3</sup>	2500	1070	950	7900
Módulo de elasticidade ( $E$ )	GPa	70	15	300	200
Resistência à tração ( $f_t$ )	MPa	30-50	$\geq 23$	34.5	-
Resistência à compressão ( $f_c$ )	MPa	1000	-	-	-
Energia de fratura ( $G_f$ )	N/m	10*	-	-	-
Coefficiente de Poisson ( $\mu$ )	-	0.23	0.5	0.5	0.3
Coef. de expansão térmica ( $\alpha$ )	K <sup>-1</sup>	$9.0 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-6}$	$12.5 \times 10^{-5}$	$15.0 \times 10^{-6}$
Tensão última ( $f_u$ )	MPa				631.1
Tensão de cedência ( $f_y$ )	MPa				271.1
Extensão última ( $\epsilon_u$ )	%				$\geq 45$

\*Materiais cerâmicos

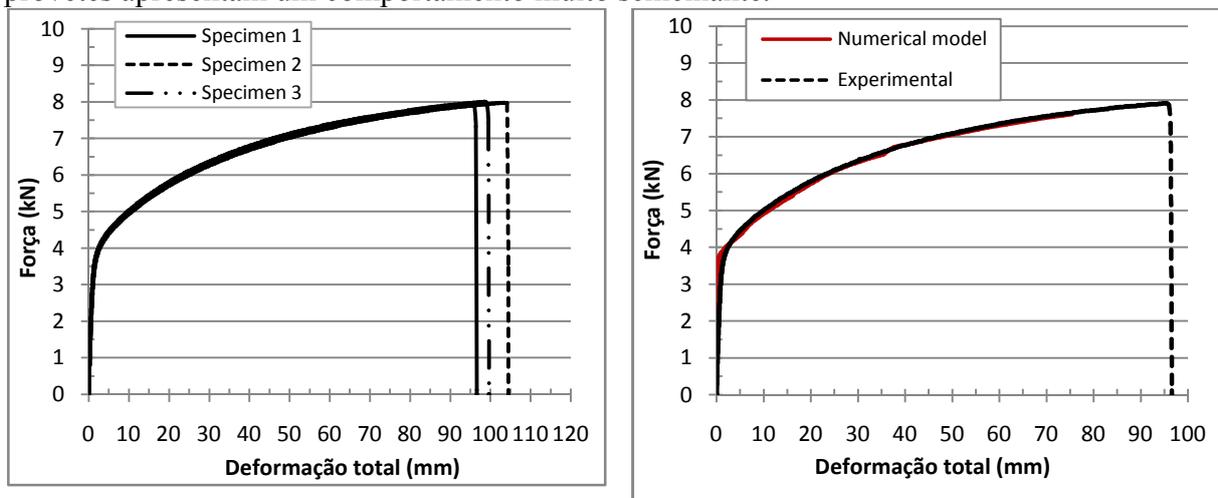
Nos provetes de vidro laminado foram considerados dois tipos de material intercalar, o Polivinil Butiral, mais conhecido por PVB, e o SentryGlas. O PVB é um dos tipos mais utilizados de película intercalar para vidro laminado e o SentryGlas é um material desenvolvido mais recentemente. O PVB é um material viscoelástico com características mecânicas que dependem essencialmente da temperatura e da duração do carregamento e o SentryGlas é um material concebido a partir de resinas iônicas desenvolvidas pela DuPont™. De acordo com o fabricante [4], o SentryGlas é cerca de cem vezes mais rígido e cinco vezes mais resistente que o PVB, oferecendo uma maior resistência e rigidez ao vidro laminado.

Para avaliar o comportamento do aço inoxidável utilizado nos provetes, foram realizados ensaios de tração tendo em conta as disposições definidas na norma EN 10002-1:2001 [5] para chapas metálicas lisas com espessura inferior a 3 mm. Foram efetuadas algumas adaptações à geometria do provete, relacionadas com a presença da furação.



**Fig. 2:** Dimensões dos provetes de aço (em mm) e configuração dos ensaios experimentais

Na Fig 3.a estão representadas as curvas que relacionam força com deformação para os provetes ensaiados. A deformação medida corresponde ao deslocamento entre amarras, já que não foi possível medir apenas a deformação do próprio provete. Para definir os parâmetros do material utilizados no modelo numérico, consideraram-se os valores nominais relativos ao tipo de aço inoxidável utilizado, que depois foram ajustados de modo a que o comportamento dos dois modelos se aproximasse. De uma forma geral, pode-se concluir que todos os provetes apresentam um comportamento muito semelhante.



a) Resultados experimentais

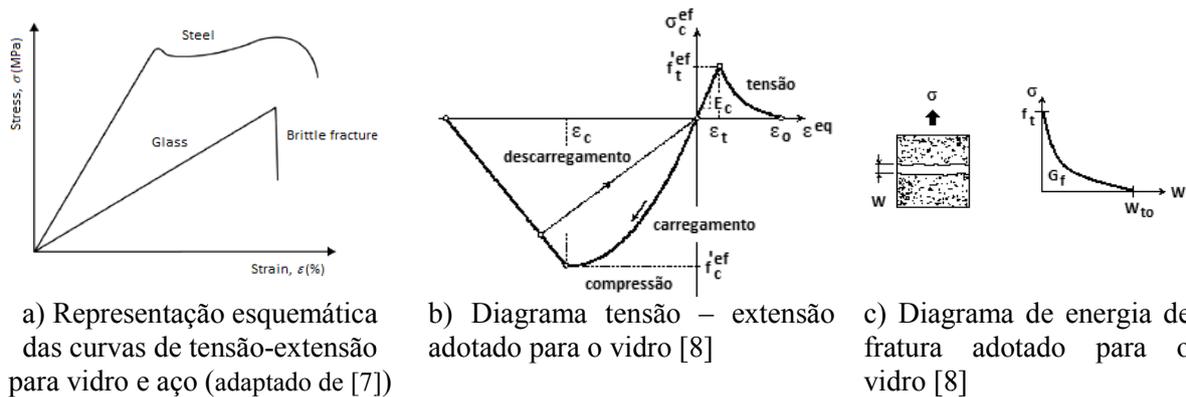
b) Resultados experimentais e numéricos

**Fig. 3:** Relação entre Força e Deformação – modelos experimentais e modelo numérico

### 3. Leis constitutivas

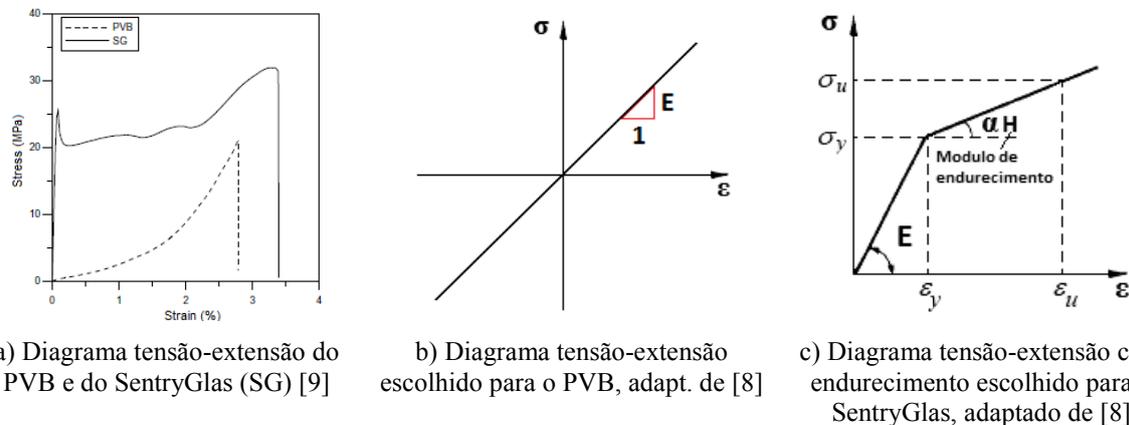
O vidro é um material cerâmico frágil com um comportamento mecânico aproximadamente linear elástico (Fig. 4.a). Tal como o betão, é um material com elevada resistência à compressão e baixa resistência à tração.

O comportamento do vidro é definido no software ATENA<sup>®</sup> através do modelo “3D Nonlinear Cementitious”, que é um modelo desenvolvido para betão. Na Fig. 4.b e 4.c estão representadas as leis de comportamento adotadas.



**Fig. 4:** Diagramas de comportamento do vidro

A Fig. 5 apresenta as relações tensão-extensão escolhidas para cada um dos materiais intercalares, tendo por base o comportamento experimental obtido e referido em [9].



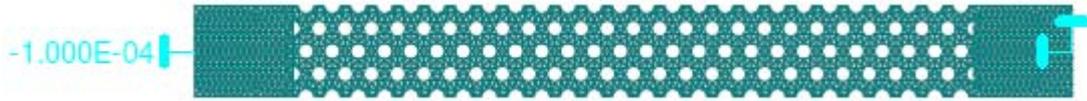
**Fig. 5:** Diagramas de tensão-extensão escolhidos para os materiais intercalares

Para simular o comportamento da chapa de aço é definido o modelo “3D Bilinear Steel Von Mises”, que considera um comportamento elástico-plástico com endurecimento, ao qual se associa o critério de rotura de Von Mises.

### 4. Modelo preliminar da chapa perfurada

As características geométricas e mecânicas da chapa adotadas na simulação numérica são definidas em concordância com os ensaios experimentais. O modelo numérico apresenta a mesma forma e geometria que os provetes testados, com o mesmo comprimento entre as amarras, a mesma largura e espessura.

A malha de elementos finitos é definida por elementos triangulares com o tamanho de 2 mm em todos os elementos. O carregamento é efetuado impondo acréscimos de deformação de 0.1 mm por incremento. Para a resolução do sistema não linear é utilizado o método de Newton-Raphson existente na biblioteca interna do programa. Na Fig. 6 está representado o modelo numérico da chapa de aço perfurada.



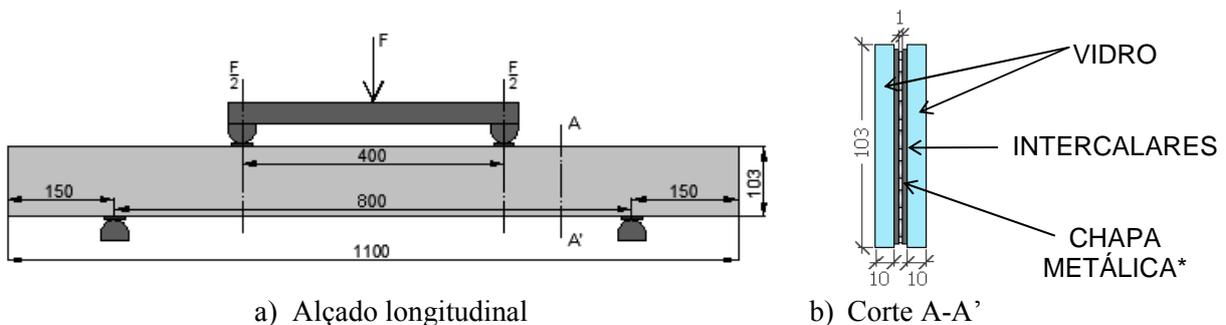
**Fig. 6:** Modelo numérico e malha de elementos finitos

A superfície sólida em cada extremidade da chapa apresenta uma espessura muito superior à da chapa, que tem como objetivo a distribuição uniforme da força de tração na secção transversal ao longo da chapa. Apenas se considera a deformação da chapa na zona perfurada. Para a validação do modelo numérico, comparam-se os resultados numéricos obtidos com os resultados experimentais já existentes.

A Fig. 3.b compara as curvas força-deformação obtidas com o modelo numérico e nos ensaios experimentais. Na fase elástica o modelo numérico apresenta uma rigidez ligeiramente superior à do modelo experimental. A força de cedência apresenta valores muito semelhantes para ambos os modelos e na fase plástica o modelo numérico acompanha de forma muito satisfatória o comportamento do modelo experimental. Em geral, pode-se concluir que as curvas numérica e experimental apresentam uma tendência muito semelhante de comportamento.

## 5. Modelo numéricos de vigas de vidro laminado

A vigas simples de vidro laminado concebidas e testadas experimentalmente por Marinho [1] são constituídas por duas lâminas de vidro com 1100 mm de comprimento, 103 mm de altura média e 10 mm de espessura, e uma película intercalar com a mesma altura e comprimento que as lâminas de vidro, e uma espessura de 1.52 mm. As vigas encontram-se simplesmente apoiadas, apresentando um vão de 800 mm. O carregamento é aplicado com controlo de deformação em 2 pontos distaciados de 200 mm em relação ao meio vão. São impostos incrementos de deformação de 1 mm/min. A existência de um elemento metálico colocado a meio vão da viga permite a distribuição da carga aplicada, ( $F$ ), em duas forças concentradas, ( $F/2$ ), de modo a evitar a concentração de tensões a meio vão da viga. A Fig. 7 ilustra as dimensões e a disposição das vigas de vidro laminado testadas.



a) Alçado longitudinal

b) Corte A-A'

**Fig. 7:** Geometria do provete de vidro laminado

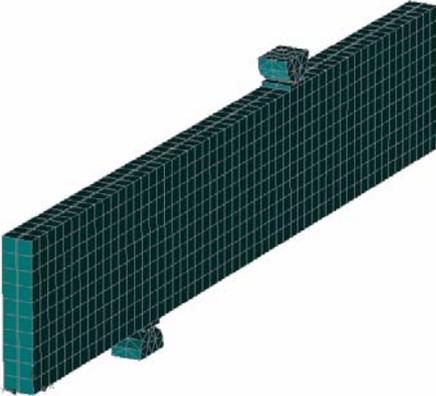
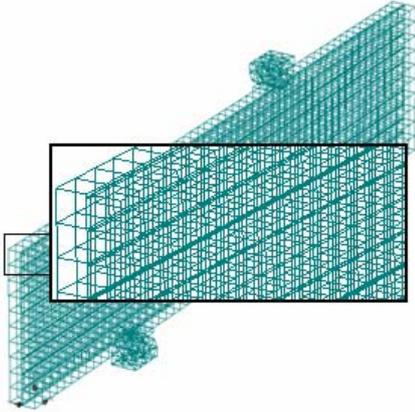
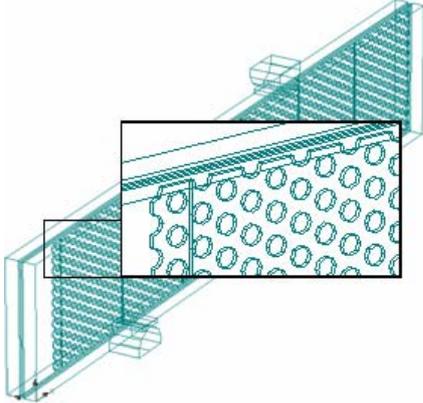
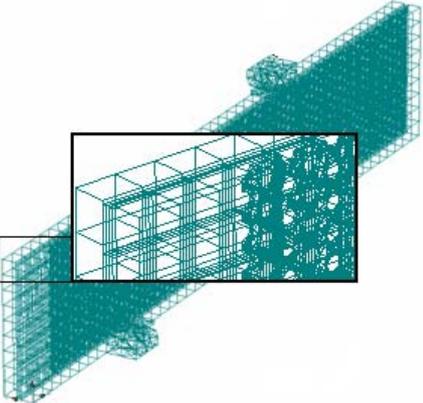
\* a chapa metálica existe apenas nos provetes reforçados

As vigas testadas são simétricas no seu comprimento e por simplificação apenas se modela metade da viga de vidro laminado. Assim sendo, o comprimento das lâminas de vidro e da película do intercalar no modelo numérico é de 550 mm, a altura mantém-se inalterada e a espessura das lâminas de vidro também. Durante a realização dos ensaios experimentais mediu-se a espessura de cada provete para analisar a variação de espessura ocorrida decorrente do processo de laminação. Assim, os modelos numéricos apresentam espessuras diferentes das películas intercalares. Os modelos com PVB apresentam uma espessura média de 1.05 mm, enquanto que a espessura média dos modelos com SentryGlas é de 1.2 mm.

A malha de elementos finitos é definida por elementos cúbicos com 10 mm de lado para todos os elementos. O carregamento é pontual e aplicado de forma incremental com controlo de deslocamento. O valor de cada incremento é igual a 0.02 mm (sentido descendente).

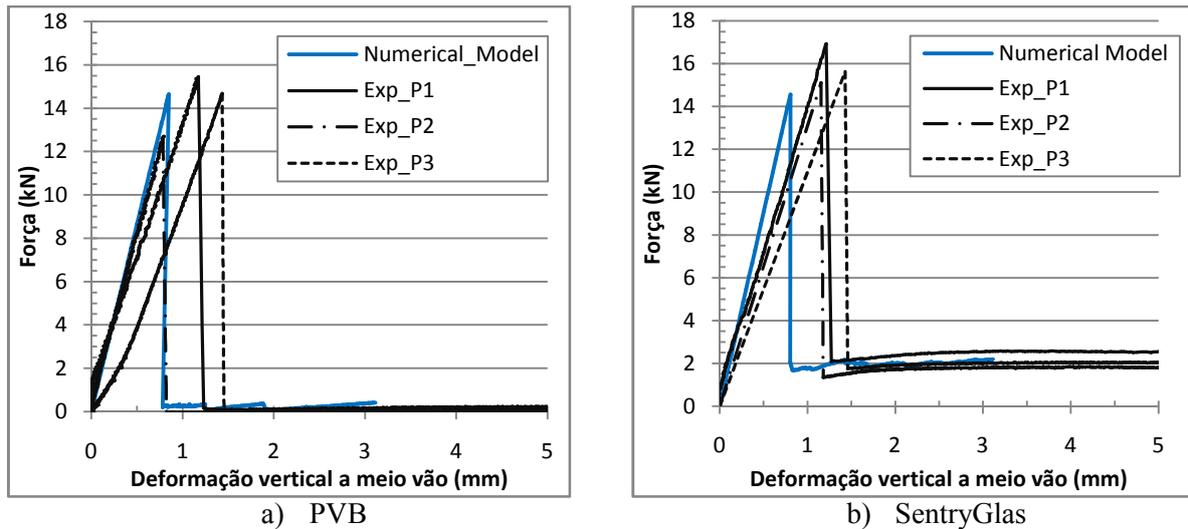
Para a resolução do sistema não linear é utilizado o método Newton-Raphson. Na Tabela 2 está representado o modelo numérico do provete de vidro laminado e a respetiva malha de elementos finitos.

**Tabela 2:** Modelo numérico e malha de elementos finitos

	Modelo numérico	Malha de elementos finitos
Vigas não reforçadas		
Vigas reforçadas com chapa perfurada		

### 5.1 Vigas de vidro laminado não reforçadas

Na Fig. 8 apresentam-se diagramas que relacionam a carga aplicada nas vigas com a correspondente deformação vertical medida a meio vão. Os resultados experimentais foram obtidos por Marinho [1] e são comparados com os resultados numéricos obtidos no âmbito do presente trabalho.



**Fig. 8:** Relação entre força aplicada e deformação medida a meio vão em vigas não reforçadas

Ao analisar a Fig. 8, verifica-se que os modelos numéricos apresentam um comportamento muito semelhante ao dos modelos experimentais: os valores da força máxima e os valores da força residual são próximos e a rotura nos modelos numéricos é frágil tal como aconteceu nos ensaios experimentais. Na fase elástica, as curvas numérica e experimental apresentam uma tendência de evolução semelhante, embora se observe que a rigidez dos modelos numéricos tende a ser mais elevada.

O valor da força diminui rapidamente depois de atingir o seu valor máximo. Nos provetes e modelo numérico com PVB, a resistência residual é próxima de zero, mas nos provetes e modelo numérico com SentryGlas, verifica-se uma resistência residual de cerca de 2 kN.

A principal diferença que se observa entre o modelo numérico e o experimental é o nível de deformação na fase plástica. O modelo numérico não consegue desenvolver a mesma deformação vertical que o modelo experimental.

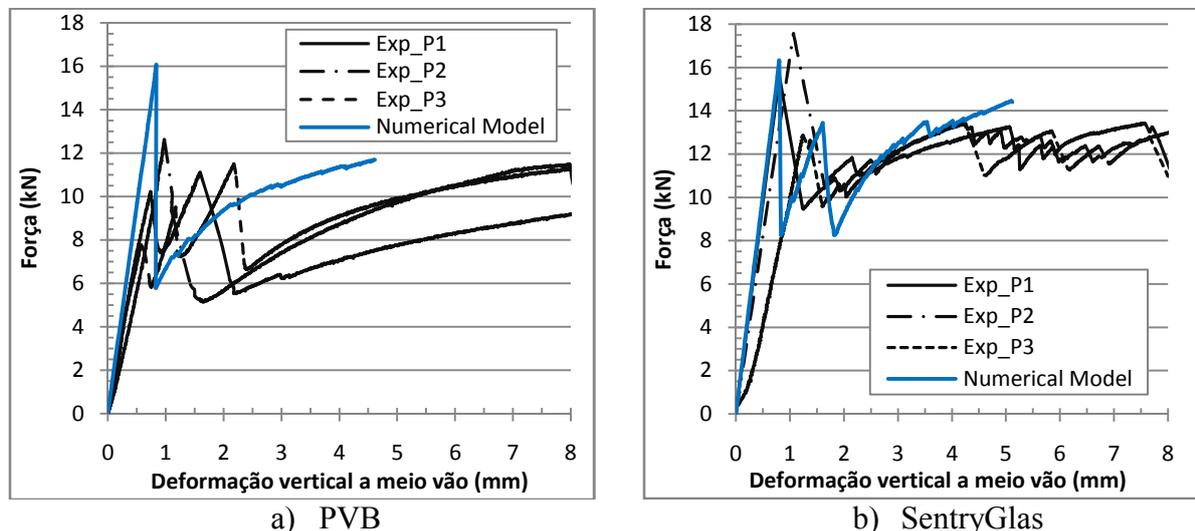
A Tabela 3 resume os valores médios de carga máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ), carga residual ( $F_{res}$ ) e deformação vertical correspondente a  $F_{m\acute{a}x}$ , obtidos nos ensaios realizados e nos modelos numéricos desenvolvidos.

**Tabela 3:** Resultados obtidos dos modelos numéricos e ensaios experimentais

Tipo / Material intercalar	Carga Máxima, $F_{m\acute{a}x}$ (kN)		Carga Residual, $F_{res}$ (kN)		Deformação vertical medida para $F_{m\acute{a}x}$ (mm)	
	Modelo Numérico	Experimental (Valor médio)	Modelo Numérico	Experimental (Valor médio)	Modelo Numérico	Experimental (Valor médio)
Vigas não reforçadas / PVB	14.63	14.40	0.21	0.13	0.84	2.17
Vigas não reforçadas/ SentryGlas	14.55	16.09	2.06	2.21	0.80	2.16
Vigas reforçadas / PVB	16.03	11.81	5.79	9.37	0.84	1.02
Vigas reforçadas / SentryGlas	16.27	16.40	8.26	12.85	0.80	1.83

## 5.2 Vigas de vidro laminado reforçadas com chapa de aço inoxidável perfurada

A Fig. 9 apresenta os resultados obtidos nos modelos numéricos com chapa de aço perfurada e compara as curvas força – deformação a meio vão com as correspondentes curvas obtidas nos ensaios experimentais.



**Fig. 9:** Relação entre força aplicada e deformação medida a meio vão em vigas de vidro reforçadas

No caso das vigas com PVB reforçadas com chapa perfurada, verifica-se que a força residual obtida numericamente é próxima da correspondente força experimental e que a curva força – deformação a meio vão na fase plástica apresenta uma trajetória idêntica à da curva experimental (Fig. 9.a). Na fase elástica do carregamento, o modelo numérico apresenta uma rigidez apenas um pouco superior às rigidezes experimentais mas atinge uma força máxima bastante superior à do modelo experimental. Após ser atingida a carga máxima, verifica-se uma perda de carga acentuada, seguida de uma recuperação progressiva da capacidade de carga, que se mantém, no modelo numérico, até elevados valores de deformação.

No ensaio experimental, esta recuperação também acontece, mas verifica-se uma segunda perda pontual de carga em alguns provetes. A partir desse momento, o provete volta a ser capaz de recuperar, atingindo uma carga que é próxima da carga máxima atingida antes da primeira perda de carga. Esta recuperação de carga é conseguida quando se verificam valores de deformação vertical máxima muito elevados (cerca de  $L/100$ , sendo  $L$  o vão da viga).

No modelo numérico, a recuperação de carga é muito significativa, mas o modelo não é capaz de atingir a carga que tinha sido aplicada antes da primeira perda de carga.

O modelo numérico da viga com SentryGlas reforçada com chapa metálica apresenta valores para a força residual muito similares aos valores obtidos experimentalmente e a curva força – deformação a meio vão evolui de forma similar à dos modelos experimentais (Fig. 9.b). Na fase elástica do carregamento os resultados dos modelos numéricos definem uma rigidez também próxima da rigidez obtida por via experimental. O valor da força máxima obtida numericamente está dentro do intervalo dos valores obtidos nos ensaios experimentais.

Nos ensaios experimentais de vigas com SentryGlass reforçadas com chapa há uma perda de carga importante associada ao aparecimento da primeira fenda no vidro, à qual se segue uma sucessão de picos e perdas de carga que resultam do aparecimento progressivo de fendas ao longo da zona de meio vão da viga. Este fenómeno também acontece nas vigas com PVB reforçadas com chapa, mas é mais definido nas vigas com SentryGlas reforçadas. Nos modelos numéricos, identifica-se esta mesma tendência nas vigas com SentryGlas reforçadas

com chapa perfurada, embora não seja possível observar uma fendilhação distribuída numa zona tão alargada como a do modelo experimental (Fig. 10).

Nas vigas reforçadas em que se utilizou SentryGlas como material intercalar, verifica-se que o valor da força residual é apenas 22% inferior ao valor da força máxima atingida no modelo experimental. Nos modelos numéricos, esta diferença é maior e o valor da força residual é 49% inferior ao valor da força máxima atingida.

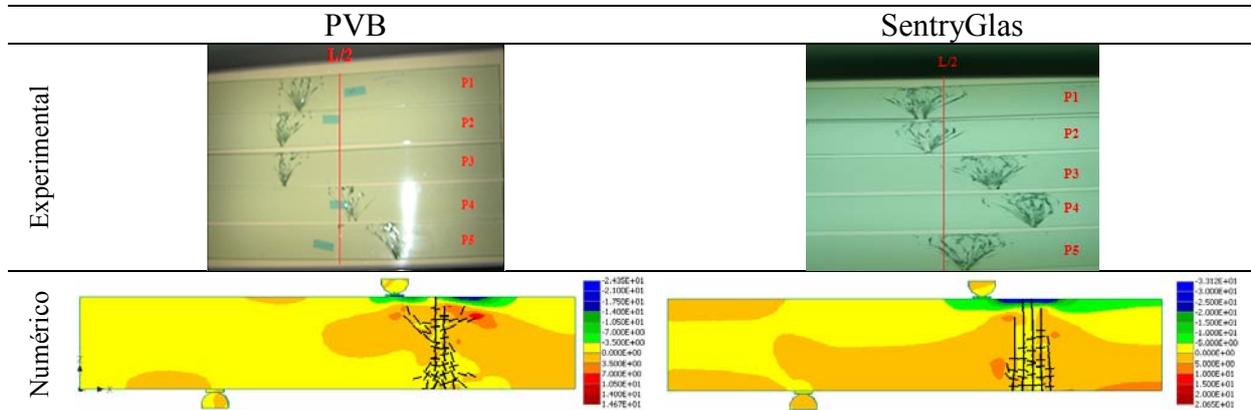


Fig. 10: Fendilhação do vidro em vigas não reforçadas

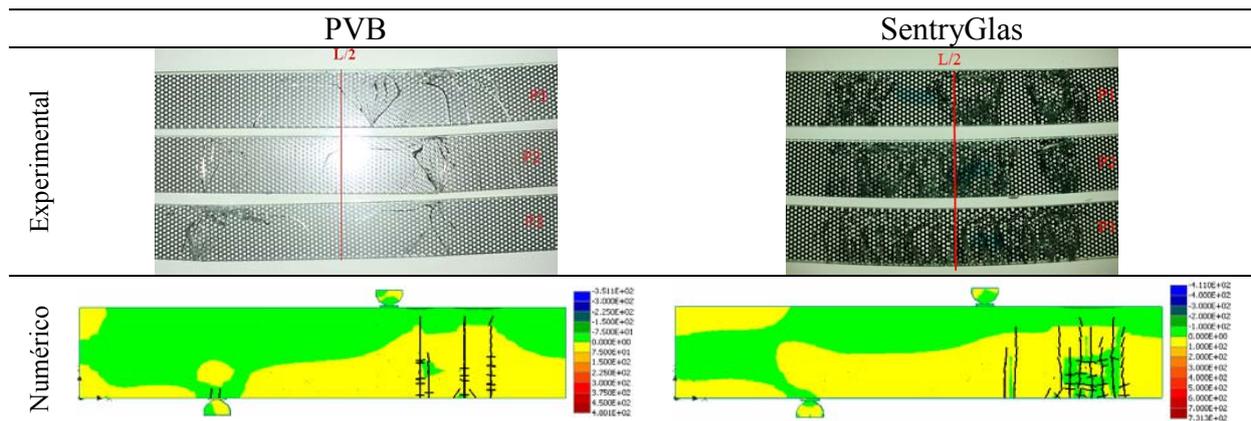


Fig. 11: Fendilhação do vidro em vigas reforçadas com chapa metálica perfurada

## 6. Conclusões

Nos resultados obtidos é possível observar que a solução de incluir chapas de aço perfuradas nas camadas intermédias do vidro laminado é uma técnica promissora para aumentar a ductilidade dos elementos de vidro e a sua segurança. Por um lado, verifica-se que o valor da capacidade resistente residual é muito maior nos provetes reforçados com chapa do que nos provetes não reforçados. Por outro lado, constata-se que é possível obter elevada capacidade de carga para valores de deformação vertical das vigas de vidro reforçadas que são elevados e muito superiores aos valores de deformação obtidos em vigas não reforçadas.

Verifica-se ainda que os provetes reforçados com chapa sofrem modos de rotura menos frágeis, já que as chapas metálicas absorvem pelo menos parte dos esforços de tração que se verificam na zona inferior das vigas, no momento em que estas fendilham.

Verifica-se que os modelos numéricos desenvolvidos têm ainda de ser afinados de modo a melhorar a distribuição da fendilhação no vidro, traduzindo melhor a sua configuração específica.

## Agradecimentos

Este trabalho é financiado por Fundos FEDER, através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE, e por Fundos Nacionais, através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto PTDC/ECM/116609/2010 – S-GLASS: Desempenho Estrutural e Regras de Projeto de Vigas de Vidro Reforçadas Externamente.

## Referências

- [1] Marinho, B. F. S., “*Caracterização Experimental do Vidro Laminado como Material Estrutural – Avaliação da Influência dos Elementos Intercalares e da Temperatura*”, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, Outubro de 2012.
- [2] Feirabend, S., *Reinforced Laminated Glass*, Challenging Glass: Proc. intern. symp., Delft, 22-23 May 2008.
- [3] EN 572-1: 2004 “*Basic soda lime silicate glass products*” - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties.
- [4] DuPont, “*SentryGlas®Plus interlayer (SGP) for laminated safety glazing is the latest innovation in DuPont's family of glass laminating products*”. Disponível em: [http://www2.dupont.com/Building\\_Innovations/zh\\_CN/assets/downloads/SGPintro\\_E.pdf](http://www2.dupont.com/Building_Innovations/zh_CN/assets/downloads/SGPintro_E.pdf), Visitado: 28/11/2012.
- [5] NP EN 10002-1: 2001, “*Metallic materials - Tensile testing*”, Part 1: Method of test at ambient temperature
- [6] Delincé, D.; Callewaert, D.; Belis, J.; Van Impe R., “*Experimental Investigation of The Influence of Temperature on Local Bridging Behavior in Laminated Glass Elements in Post-Breakage State*”, Laboratory of Structural Engineering, Ghent University, Belgium, 2008.
- [7] Guerra Martins, J.; Lopes Pinto, E. “*Materiais de Construção I - O Vidro*”. 1ª Edição, 2004.
- [8] Cervenka, V.; Jendele, L.; Cervenka J., (2011) “*ATENA Program Documentation: Part 1: Theory*.” Prague.  
Disponível em: [http://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA\\_Theory.pdf](http://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf)
- [9] Biolzi, L.; Cattaneo, S.; Rosati, G., “*Progressive Damage and Fracture of Laminated Glass Beams*” Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano. Construction and Building Materials 24 (2010), 577–584.